



LUND UNIVERSITY

Livscykelanalys av Salixproduktion

Börjesson, Pål

2006

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Börjesson, P. (2006). *Livscykelanalys av Salixproduktion*. (IMES/EESS Report; Vol. 60). Department of Environmental and Energy Systems Studies, Lund university.

Total number of authors:

1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00



LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
Lunds universitet

Institutionen för teknik och samhälle
Avdeleningen för miljö- och energisystem

Livscykelanalys av Salixproduktion

Pål Börjesson

Rapport nr 60

Maj 2006

Dokumentutgivare, Dokumentet kan erhållas från LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA vid Lunds universitet Institutionen för teknik och samhälle Avdelningen för miljö- och energisystem Gerdagatan 13 223 62 Lund Telefon: 046-222 00 00 Telefax: 046-222 86 44	Dokumentnamn Rapport Utgivningsdatum Maj 2006 Författare Pål Börjesson
--	--

Dokumenttitel och undertitel Livscykelanalys av Salixproduktion

Sammandrag

Syftet med denna studie är att genomföra en livscykelanalys (LCA) av Salixproduktion baserat på dagens produktionsmetoder och växtmaterial. En målsättning är att beskriva miljöpåverkan från produktionscykelns olika steg och identifiera de steg som svarar för de största bidragen. Salixproduktionen antas ske på bra åkermark i södra Sverige. Resultaten visar att Salixodling är ett energieffektivt produktionssystem som ger drygt 20 gånger mer energi i form av biomassa än vad som krävs i form av insatsenergi. Jämfört med odling av ettåriga energigrödor som t ex raps och vete är energibalansen (energiskörd / energiinsats) drygt 3 gånger högre och utsläppen av växthusgaser, övergödande och försurande ämnen samt ämnen som kan bilda fotokemiska oxidanter oftast mellan 2 till 4 gånger lägre. Gödsling är den aktivitet i Salixodling som kräver mest insatsenergi, cirka hälften, och ger upphov till huvuddelen av livscykelemissionerna, oftast mellan 50 till 80 %. Därefter kommer skörd, cirka 30 % av energiinsatsen och 7 till 15 % av utsläppen med undantag för ämnen som kan bilda fotokemiska oxidanter (50 %), och till sist etablering och flistransport som normalt bidrar till mellan 2 till 10 % av de totala utsläppen. Ett effektivt sätt att minska livscykelemissionerna från Salixproduktion är genom effektivare tillverkning av konstgödsel med minskade utsläpp av framför allt lustgas. Alternativa sätt är att använda näringsrika organiska restprodukter som t ex avloppsslam och avloppsvatten som gödselmedel, vilket redan görs i Salixodling idag. Förändrad skördenivå samt förändrat transportavstånd och kväveläckage har en något mindre påverkan på livscykelemissionerna.

Nyckelord
Livscykelanalys, energibalans, energiskog, Salix

Omfång 21	Språk Svenska Sammandrag på engelska	ISRN ISRN LUTFD2/TFEM--06/3051--SE + (1-21)
ISSN ISSN 1102-3651	ISBN ISBN 91-88360-83-0	

Intern institutionsbeteckning
Rapport nr 60

Organisation, The document can be obtained through LUND UNIVERSITY	Type of document Report
---	-----------------------------------

Department of Technology and Society Environmental and Energy Systems Studies Gerdagatan 13, SE-223 62 Lund, Sweden Telephone: int+46 46-222 00 00 Telefax: int+46 46-222 86 44	Date of issue May 2006
	Authors Pål Börjesson

Title and subtitle

Life Cycle Assessment of Willow Production

Abstract

The aim of this study is to make a life cycle assessment (LCA) of willow production (*Salix*) based on current cultivation practices and commercial clones. The purpose is to describe the environmental impact of the different phases in the production system and identify phases which have a significant impact on the total life cycle emissions. The production of willow is assumed to take place in southern Sweden on good agricultural soils. The results show that the production of willow is an energy efficient biomass production system which gives 20 times more energy in the form of biomass than the required energy input. In comparison with cultivation of annual energy crops, such as rape and wheat, the energy balance (energy output / energy input) of willow production is more than 3 times higher. The emissions of greenhouse gases and pollutants leading to eutrophication, acidification and creation of photochemical oxidants are often 2 to 4 times lower in willow production. The phase in willow production which requires the highest energy input, some 50 %, is fertilisation. Fertilisation also causes the highest emissions, often between 50 to 80 %, of the total life cycle emissions. Thereafter comes harvesting, with about 30 % of the energy input and 7 to 15 % of the emissions (except for the emissions leading to the creation of photochemical oxidants, some 50%), followed by establishment and transportation which normally contribute to 2 to 10 % of the total life cycle emissions. A measure to efficiently reduce the life cycle emissions of willow production is through a higher efficiency in the production of commercial fertilisers including flue-gas cleaning, leading to reduced emissions, particularly of nitrous oxide (N₂O). Other alternatives are utilising nutrient-rich organic waste products, such as sewage sludge and municipal waste water as fertilisers, which are already in practice in some willow cultivations today. Changed biomass yields, transportation distances and nitrogen leaching will have a somewhat lower impact on the total life cycle emissions.

Keywords

Life Cycle Assessment, Energy Balance, Willow, Short Rotation Coppice

Number of pages 21	Language Swedish, English abstract	ISRN ISRN LUTFD2/TFEM--06/3051--SE + (1-21)
ISSN ISSN 1102-3651	ISBN ISBN 91-88360-83-0	

Department classification

Report No. 60

Förord

Denna studie har genomförts med ekonomiskt stöd från Agrobränsle AB.

Lund, Maj 2006

Pål Börjesson

Innehållsförteckning

1.	Bakgrund.....	3
2.	Syfte.....	3
3.	Metod.....	3
4.	Antaganden och beskrivning av produktionssystemet.....	4
	4.1 Etablering och återställning	6
	4.2 Gödning.....	6
	4.3 Skörd	8
	4.4 Transport	8
5.	Resultat	9
6.	Analys av betydande faktorer	11
	6.1 Skördenivå	11
	6.2 Lustgasemissioner	12
	6.3 Kväveläckage	13
	6.4 Transportavstånd	13
7.	Slutsatser och diskussion	14
8.	Referenser	16

BILAGOR

Bilaga 1. Karakteriseringsfaktorer

Bilaga 2. Inventeringsdata

Bilaga 3. Resultatsammanställning

1. Bakgrund

Med ett ökat intresse för bibränslen börjar dessa granskas alltmer utifrån energi-, resurs-, och miljöeffektivitet. En energigröda som i tidigare studier ofta visat ha hög energieffektivitet, ge högt nettoutbyte per hektar åkermark och ha bra miljöprestanda, jämfört med andra energigrödor, är Salix. Befintliga miljö- och energianalyser av åkerbränslen är dock ofta utförda under början och mitten av 1990-talet och innan metodologin för livscykelanalys (LCA) blivit standardiserad. Därför finns ett behov att uppdatera inventeringsdata för att beakta den utveckling som skett under det senaste decenniet samt att genomföra livscykelanalyser enligt den ISO-standard som nu finns.

2. Syfte

Syftet med denna studie är att genomföra en livscykelanalys av Salixproduktion baserat på dagens produktionsmetoder och växtmaterial. Utgångspunkten är svenska förhållanden. En målsättning är att tydligt beskriva miljöpåverkan från produktionscykelns olika steg och identifiera de steg som svarar för de största bidragen. Här ingår också analys av känslighet och osäkerhet av indata avseende de parametrar som har stor påverkan på slutresultatet. En annan målsättning är att presentera indata, antaganden och resultat på ett transparent sätt så att läsaren ska kunna använda studien som underlag för egna beräkningar och analyser.

3. Metod

Livscykelanalysen utförs enligt ISO standard 14041-43 (ISO, 1998; 2000). Datainsamling baseras på litteraturstudier av framför allt svenska publikationer, men i viss utsträckning också internationella publikationer. Vid behov sker datainsamling också via intervjuer med nyckelpersoner. Den funktionella enheten är produktion av 1 MJ Salixflis levererat till energianläggning. Såväl direkta som indirekta energiinsatser och emissioner beaktas liksom biologiskt/kemiskt baserade markemissioner. I Tabell 3.1 beskrivs de emissioner och miljöeffektkategorier som inkluderas i studien. De omräkningsfaktorer (karakteriseringsfaktorer) som används för omräkning av utsläppsdata till miljöeffektkategorier redovisas i Bilaga 1. Förbrukningen av hjälpenergi under produktionscykeln av Salixflis avser primärenergi.

Tabell 3.1. Beskrivning av de miljöeffektkategorier som inkluderas i denna studie samt vilka emissioner som ingår i respektive kategori.

Miljöeffektkategori	Ingående emissioner	Uttrycks som
Växthuseffekt	CO ₂ , CO, CH ₄ , N ₂ O	Koldioxidekvivalenter
Övergödning	NO _x , NH ₃ , NO ₃	Fosfatekvivalenter
Förurning	SO ₂ , NO _x , NH ₃	Svaveldioxidekvivalenter
Bildning av fotokemiska oxidanter	CO, HC, CH ₄	Etenekvivalenter
Utsläpp av partiklar	partiklar	Partiklar
Energiförbrukning		Primärenergi

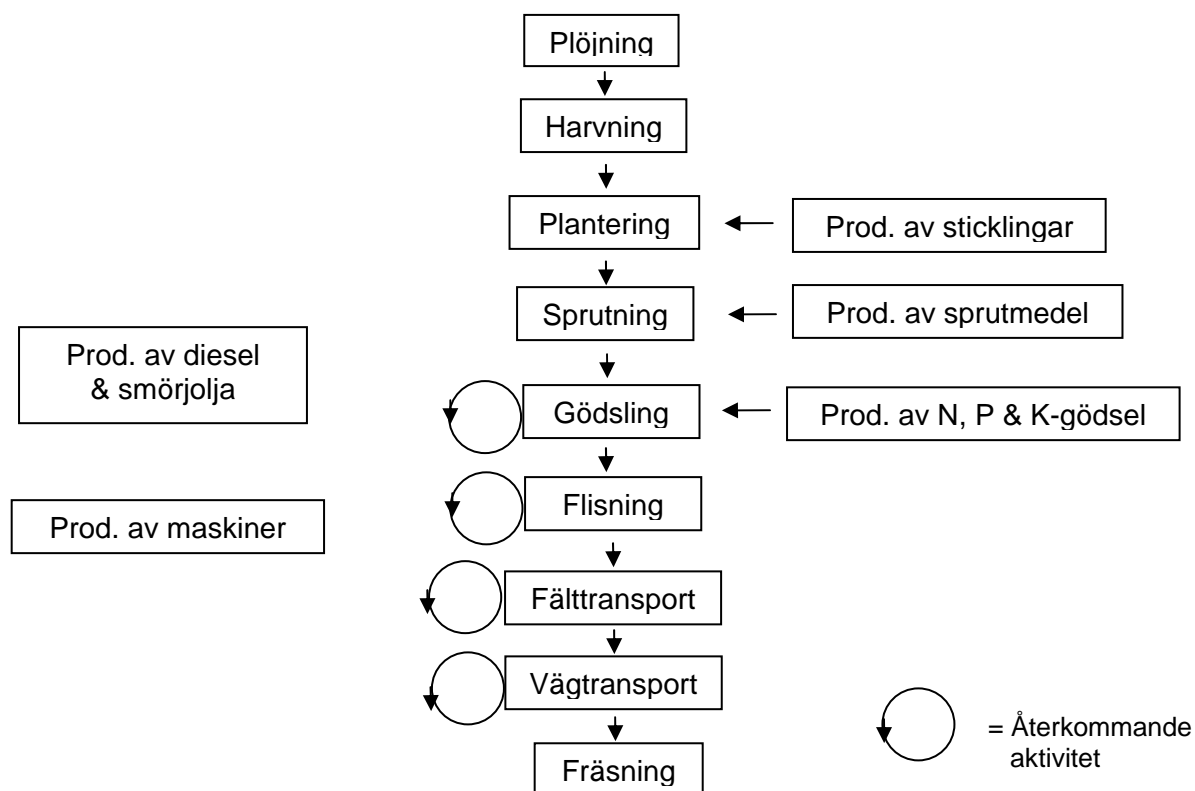
4. Antaganden och beskrivning av produktionssystemet

Salixproduktionen antas ske på bra åkermark i södra Sverige och med sorter som är kommersiella idag. Medelavkastningen antas vara 10 ton torrs substans (ts) per hektar och år i grundfallet. Odlingen antas ha en livslängd om 22 år där skörd sker vart tredje år. Första skörd sker dock efter år fyra med en 60 % lägre skördenivå. Första året efter plantering sker avkapning av årsskotten. Med ett värmevärde om 16,5 GJ per ton ts (lägre värmevärde) och hänsyn till den lägre avkastningen vid förstaskörd blir den genomsnittliga energiskörden 155 GJ per hektar och år under Salixodlingens livslängd. En anledning till varför det lägre värmevärdet valts är att tidigare livscykelanalyser av energigrödor ofta baseras på detta (se t ex Bernesson m fl. 2004a; 2004b). Det högre värmevärdet för Salix är cirka 18,7 GJ per ton ts, dvs cirka 13 % högre än det lägre värmevärdet. Om analysen i stället baseras på det högre värmevärdet skulle således energibalansen öka och livscykelemissionerna minska i motsvarande omfattning.

Gödselmedel tillförs i form av handelsgödsel. Skörd sker med direktflisare och transport till energiverk sker med lastbil med ett transportavstånd om 30 km. Efter avslutad odling återställs åkermarken genom mekanisk sönderdelning av rötter och stubbar (fräsning). Analysen baseras på dagens kommersiella teknik avseende lantbruksmaskiner, traktorer, lastbilar mm samt tillverkning av insatsvaror.

Produktionssystemet analyseras utifrån följande fyra delar som beskrivs schematiskt i Figur 4.1:

- 1) **Etablering och återställning**
- 2) **Gödsling**
- 3) **Skörd**
- 4) **Transport**



Figur 4.1. Schematisk beskrivning av analyserade aktiviteter i produktionskedjan av Salixflis.

Energiinnehållet i diesel antas vara 41,5 MJ primärenergi per liter vilket inkluderar energiåtgång vid produktion av bränslet (6%) och smörjmedel (1%) (38,7 MJ/l exklusive dessa tillägg) (Börjesson och Berglund, 2003; 2006; Bernesson, 2004). Dessutom inkluderas energiförbrukning vid tillverkning och underhåll av maskiner och fordon som bedöms uppgå till motsvarande 20% av dieselförbrukningen för traktorer respektive 8% av dieselförbrukningen för lastbilar (Berglund och Börjesson, 2003; 2006). Den el som används antas vara naturgasbaserad vilket bedöms motsvara långsiktig marginalet i nordnorden (Mattsson m fl. 2005). En MJ el antas motsvara 2,2 MJ primärenergi baserat på gasturbin med en verkningsgrad om 50% samt distributionsförluster om 10% (Berglund och Börjesson, 2003; 2006).

Fördelningen av olika energibärare vid produktion av olika insatsvaror antas fördela sig mellan olja, kol, naturgas och el enligt följande (i procent): sticklingar 50/0/0/50; glyfosat 50/0/30/20; kvävegödsel 5/0/90/5; fosfor- och kaliumgödsel 30/0/25/45; maskiner 20/30/5/45 (Börjesson, 1996; Börjesson och Berglund, 2003; 2006).

4.1. Etablering och återställning

I Tabell 4.1 beskrivs energiinsatsen för del olika delsteg som ingår i etablering och återställning av Salixodling, utslaget per hektar och år under odlingens hela livslängd. Markbearbetning innan plantering består av plöjning och harvning och plantering sker med sticklingar om 13000 per hektar (Rosenqvist, 2006). Ogräsbekämpning sker både mekaniskt genom harvning och kemiskt med glyfosfat. Produktion av sticklingar innefattar energiåtgång vid förädling, odling och hantering. Återställning av åkermarken efter Salixodlingens slut antas ske genom fräsning där rötter och stubbar sönderdelas.

I Tabell 4.2 summeras de emissioner som etablering av Salixodling ger upphov till, inklusive emissioner i samband med återställning av åkermarken efter odlingen slut. Specifika emissioner från olika traktoroperationer samt övrig energianvändning redovisas i Bilaga 2.

Tabell 4.1. Energiinsats (MJ per ha och år) vid etablering av Salixodling och återställning av åkermarken^a

Aktivitet	Insats av primärenergi
Plöjning	85
Harvning	45
Plantering	30
Produktion av sticklingar	330
Kemisk bekämpning	20
Produktion av bekämpningsmedel	30
Återställning (markbearbetning)	140
S:A	680

^a Bearbetad data från Börjesson (1996), Bernesson (2004) och Rosenqvist (2006).

Tabell 4.2. Emissioner (per ha och år) vid etablering av Salixodling och återställning av åkermarken^a

CO ₂	CO	NO _x	SO ₂	HC	CH ₄	Partiklar	N ₂ O	NH ₃	NO ₃ ⁻
kg	g	g	g	g	g	g	g	g	kg
62	41	320	48	19	28	6,3	0	0	0

^a Detaljerad resultatredovisning för respektive aktivitet finns beskrivet i Appendix 3.

4.2. Gödsling

Gödsling med kväve (N), fosfor (P) och kalium (K) i Salixodling antas ske enligt följande (Rosenqvist, 2006):

- 80 kg N, 22 kg P samt 73 kg K år 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20
- 120 kg N år 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21

Utslaget per hektar och år under odlingens livslängd motsvarar detta i genomsnitt 64 kg N, 7 kg P samt 23 kg K. Energiåtgången vid tillverkning av gödsel beräknas till 45 MJ per kg N, 25 MJ per kg P samt 5 MJ per kg K (Börjesson 1996; Davis och Haglund, 1999; Berglund och Börjesson, 2003; 2005). Den totala energiförbrukningen för gödsling i Salixodling redovisas i Tabell 4.3.

Tabell 4.3. Energiinsats (MJ per ha och år) vid gödsling av Salixodling^a

Aktivitet	Insats av primärenergi
Gödsling	450
Produktion av kvävegödsel	2900
Produktion av fosforgödsel	180
Produktion av kaliumgödsel	120
S:A	3700

^a Bearbetad data från Börjesson (1996), Davis och Haglund (1999), Berglund och Börjesson (2003, 2005) och Rosenqvist (2006).

Emissioner vid tillverkning av handelsgödsel baseras på data från Davis och Haglund (1999) som bearbetats i Berglund och Börjesson (2003, 2005) och som redovisas i Bilaga 2. I Tabell 4.4 redovisas de sammantagna emissionerna från gödsling av Salixodling. Davis och Haglund (1999) beräknar att utsläppen av lustgas i genomsnitt uppgår till cirka 19 g N₂O per kg N vid framställning av kvävegödsel i en genomsnittlig västeuropeisk anläggning. Efter att lustgas börjat uppmärksammas alltmer som en potent växthusgas har arbetet med att minska utsläppen från gödselmedeltillverkning tagit fart. För nuvarande pågår en utbyggnad av katalytisk rening av kväveemissioner vid många gödselmedelsanläggningar vilket kommer att leda till kraftigt minskade utsläpp av bl a lustgas (Andersson, 2005).

Som ett resultat av kvävegödsling och kemiska och mikrobiologiska processer i åkermarken kan emissioner av ammoniak (NH₃) och lustgas (N₂O) uppstå. Dessa antas enligt Bernesson (2004) uppgå till i genomsnitt 40 g NH₃ och 20 g N₂O per kg tillfört kvävegödsel, vilket för lustgas motsvarar 1,25% av tillfört kväve. Bildningen av lustgas beräknas dock kunna variera mellan i det närmaste 0% upp till 2% av tillfört kväve. Baserat på nya resultat från ett stort antal fältförsök är dock den nya rekommendationen att lustgasemissioner från gödsling av ammoniumnitrat i genomsnitt uppgår till motsvarande 0,8% av tillfört kväve (Bouwman m fl., 2002). Detta motsvarar i sin tur 13 g N₂O per kg tillfört kvävegödsel.

Tillförsel av kväve i odlingsystem medför också risk för läckage av nitratkväve. Kväveläckage från fleråriga produktionssystem som Salixodling är normalt betydligt lägre än från t ex odling av ettåriga grödor (Börjesson, 1999). En bedömning är här att kväveläckaget från Salixodling i genomsnitt uppgår till cirka 15 kg N per hektar och år, men detta kan variera betydligt beroende av jordart, årsnederbörd mm (Johnsson och Mårtensson, 2002).

Tabell 4.4. Emissioner (per ha och år) i samband med gödning av Salixodling^a

CO ₂	CO	NO _x	SO ₂	HC	CH ₄	Partiklar	N ₂ O	NH ₃	NO ₃ ⁻
kg	g	g	g	g	g	g	g	g	kg
280	120	1100	890	80	310	170	2000	2600	15

¹ Detaljerad resultatredovisning för respektive aktivitet finns beskrivet i Appendix 3.

4.3. Skörd

Skörd av Salix antas ske med en självgående flisskördare vart tredje år (under etableringsfasen sker avkapning efter första året). Skördekapaciteten antas vara i genomsnitt ett halvt hektar per timme (Sjöström, 2006). Vid skörd utnyttjas också ett traktorekipage med containerbärare för att samla och transportera Salixflisen till åkerkant/bilväg för vidare transport med containerlastbil till energianläggning. I Tabell 4.5 sammanfattas energiinsatsen för de moment som ingår vid skörd och i Tabell 4.6 sammanställs de sammantagna emissionerna.

Tabell 4.5. Energiinsats (MJ per ha och år) vid skörd av Salixodling^a

Aktivitet	Insats av primärenergi
Salixskördare – Direktflisning ^b	1700
Traktorekipage – Uppsamling och fälttransport	530
S:A	2200

^a Bearbetad data från Börjesson (1996), Bernesson (2004), Rosenqvist (2006) och Sjöström (2006).

^b Inklusivt avkapning år ett efter etablering.

Tabell 4.6. Emissioner (per ha och år) vid skörd av Salixodling^a

CO ₂	CO	NO _x	SO ₂	HC	CH ₄	Partiklar	N ₂ O	NH ₃	NO ₃ ⁻
kg	g	g	g	g	g	g	g	g	kg
180	400	1600	66	140	150	27	0	0	0

^a Detaljerad resultatredovisning för respektive aktivitet finns beskrivet i Appendix 3.

4.4. Transport

Skördad Salix transporteras i containers på lastbil till energianläggning. Energiåtgången för denna transport inkluderar tom returtransport. Transportavståndet antas vara i genomsnitt 30 km enkel väg (Rosenqvist, 2006). I Tabell 4.7 redovisas energiinsatsen i samband med lastbilstransport av Salixflis och i Tabell 4.8 emissionerna från denna transport, utslaget per hektar och år.

Tabell 4.7. Energiinsats (MJ per ha och år) vid transport av Salixflis till energianläggning^a

Aktivitet	Insats av primärenergi
Transport av Salixflis med lastbil, S:A ^b	710

^a Bearbetad data från Börjesson (1996), Berglund och Börjesson (2003, 2006) och Rosenqvist (2006).

^b Inklusivt tom returtransport från energianläggning och med ett transportavstånd om 30 km enkel väg.

Tabell 4.8. Emissioner (per ha och år) vid transport av Salixflis till energianläggning^a

CO ₂	CO	NO _x	SO ₂	HC	CH ₄	Partiklar	N ₂ O	NH ₃	NO ₃ ⁻
kg	g	g	g	g	g	g	g	g	kg
56	11	510	18	29	16	8,5	0	0	0

^aDetaljerad resultatredovisning för aktiviteten finns beskrivet i Appendix 3.

5 Resultat

I Tabell 5.1 sammanfattas energibalansen för Salixodling genom att energiskörden divideras med summan av de energiinsatser som krävs under hela produktionskedjan. Som framgår av Tabell 5.1 får man ut cirka 21 gånger mer energi i form av Salixflis än den hjälpenergi som krävs för produktion och transport.

Tabell 5.1. Energibalans (energiskörd / energiinsats) vid produktion av Salix

Parameter	
Energiskörd (GJ per hektar och år)	155
Energiinsats (GJ per hektar och år)	
Etablering och återställning	0,68
Gödsling	3,7
Skörd	2,2
Transport	0,71
S:A	7,3
Energibalans (kvot)	21

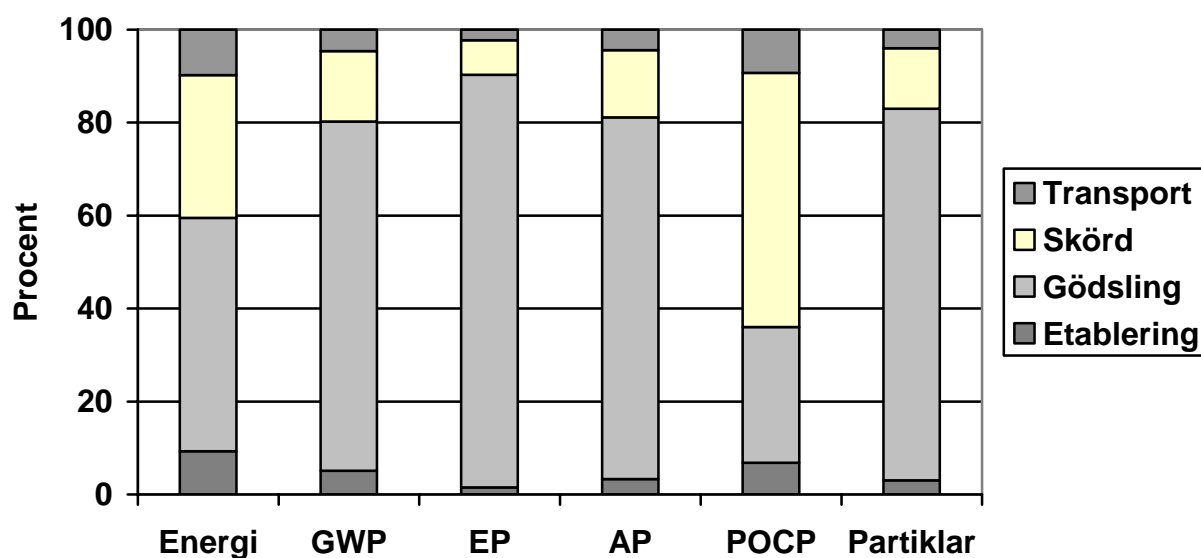
I Tabell 5.2 sammanfattas bidraget till växthuseffekten (GWP), försurningen (AP), övergödningen (EP), potentialen för bildandet av fotokemiska oxidanter (POCP) samt utsläpp av partiklar per MJ Salixflis. I Figur 5.1 beskrivs det procentuella bidraget från respektive aktivitet till respektive miljöeffektkategori. Av Tabell 5.2 och Figur 5.1 framgår det att gödsling svarar för det största bidraget (ofta mellan 50-80 %) till alla miljöeffektkategorier med undantag för potentialen för bildandet av fotokemiska oxidanter, t ex marknära ozon. Här är bidraget från skörd störst, drygt 50 %. Bidraget från etablering och transport till de olika miljöeffektkategorierna är relativt litet och varierar mellan 2 till 10 % för respektive aktivitet.

Ungefär hälften av den energiinsats som krävs vid Salixproduktion kan härledas till gödsling. Gödslingens bidrag till växthuseffekt, övergödning, försurning samt utsläpp av partiklar är dock större, mellan 75 och 90%.

Energiinsatsen vid skörd motsvarar ungefär 30% av den totala energiinsatsen, medan skördearbetets bidrag till växthuseffekt, övergödning, försurning samt utsläpp av partiklar är lägre, cirka 7 till 15%.

Tabell 5.2. Sammanfattning av miljöpåverkan vid Salixproduktion (per MJ Salixflis).

Aktivitet	GWP	EP	AP	POCP	Partiklar
	g CO ₂ - ekvivalenter	mg PO ₄ ²⁻ - ekvivalenter	mg SO ₂ - ekvivalenter	mg H ₂ C ₂ - ekvivalenter	mg
Etablering och återställning	0,41	0,27	1,8	0,06	0,04
Gödsling	5,9	16	42	0,26	1,1
Skörd	1,2	1,4	7,8	0,48	0,18
Transport	0,36	0,42	2,4	0,08	0,06
S:A	7,9	18	54	0,88	1,4

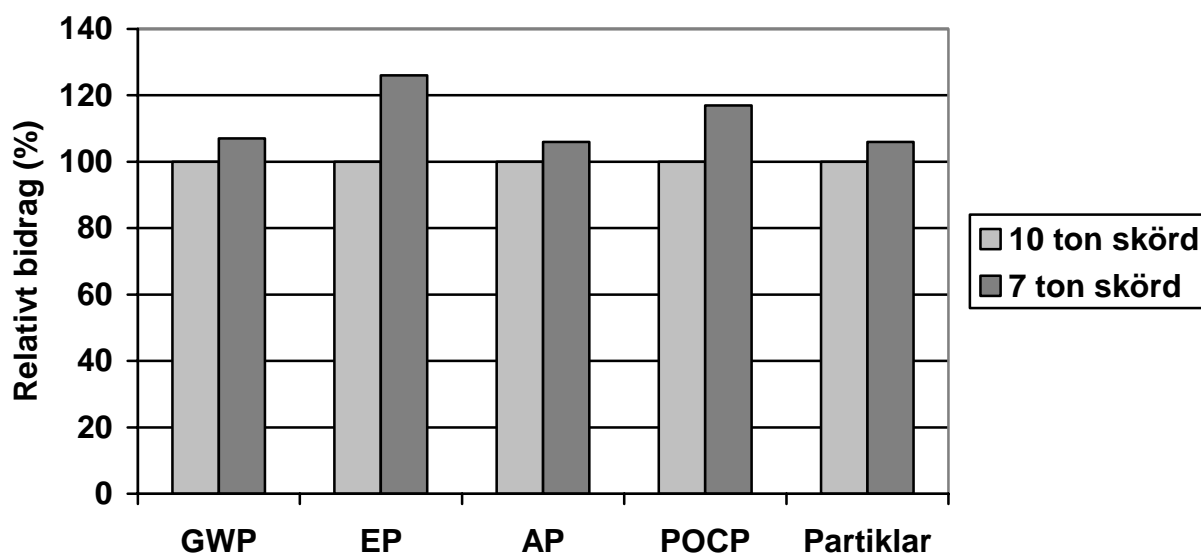


Figur 5.1. Olika aktiviteters relativa bidrag till respektive miljöeffektkategori vid Salixproduktion.

6 Analys av betydande faktorer

6.1. Skördenivå

En faktor som har betydelse för energibalans och total miljöbelastning vid Salixproduktion är skördenivån. Om t ex skördenivån för Salix sjunker från ungefär 10 till 7 ton torrs substans per hektar och år försämras energibalansen något samtidigt som utsläppen per MJ Salixflis ökar något. Dessa skillnader i energibalans och emissioner är inte direkt proportionella med skillnaden i skörd eftersom en lägre tillväxt medför att skördeintervallet kan öka från tre till fyra år samtidigt som behovet av gödsel minskar något. I Figur 6.1 illustreras hur det relativa bidraget till respektive miljöeffektkategori ökar när den genomsnittliga Salixskörden minskar från 10 till 7 ton torrs substans per hektar och år. Energibalansen beräknas i detta fall minska till ungefär 19. Som framgår av Figur 2 ökar bidraget till respektive miljöeffektkategori per MJ Salixflis med mellan 6 och 26 % där bidraget till övergödningspotentialen står för den största ökningen.

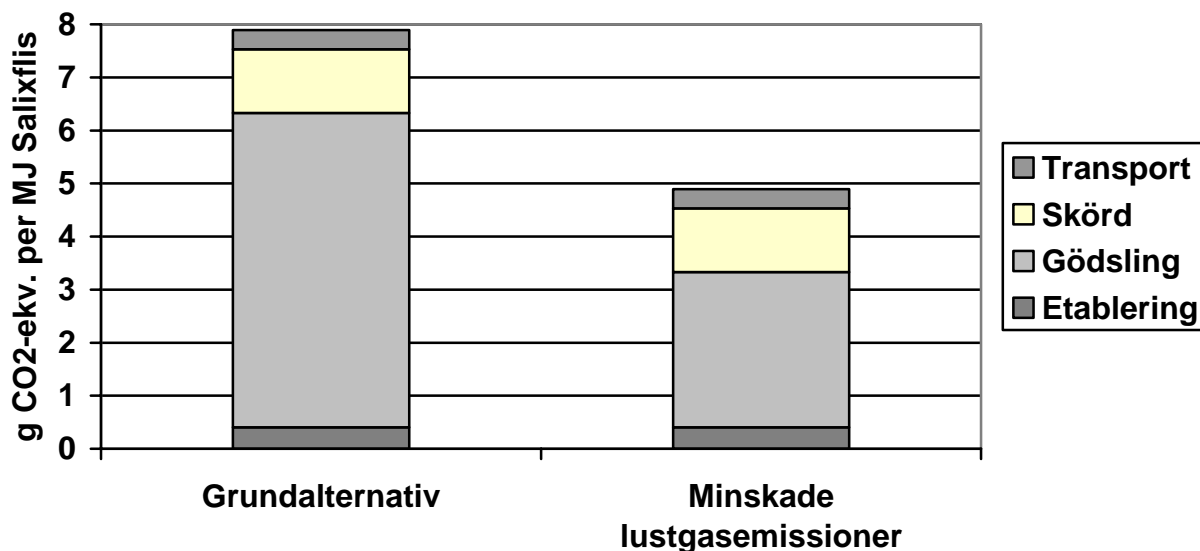


Figur 6.1. Relativ skillnad i bidrag till respektive miljöeffektkategori per MJ Salixflis när skördenivån minskar från 10 ton (grundalternativet) till 7 ton torrs substans per hektar och år.

6.2. Lustgasemissioner

Lustgas är en cirka 320 gånger mer potent växthusgas än koldioxid. Detta innebär att relativt små kvantiteter lustgas kan få relativt stora konsekvenser för bidraget till växthuseffekten (GWP). Som diskuteras i avsnitt 4.2 ger gödsling upphov till utsläpp av lustgas dels i samband med tillverkning av kvävegödsel, dels genom att en del av påfört kväve kan omvandlas till lustgas via markkemiska och markbiologiska processer. Gödselmedelsindustrin i framför allt Västeuropa har nu påbörjat ett arbete med att införa katalytisk kväverening vilket kraftigt minskar utsläppen av bl a lustgas (Andersson, 2005). I Figur 6.2 antas denna rening medföra att lustgasutsläppen vid kvävegödseltillverkning kan minska med 90%. Markemissioner av lustgas kan, som diskuteras i avsnitt 4.2, variera betydligt då storleken av dessa emissioner påverkas av en mängd olika faktorer. I Figur 6.2 antas att markemissionerna av lustgas är hälften så stora som i grundalternativet.

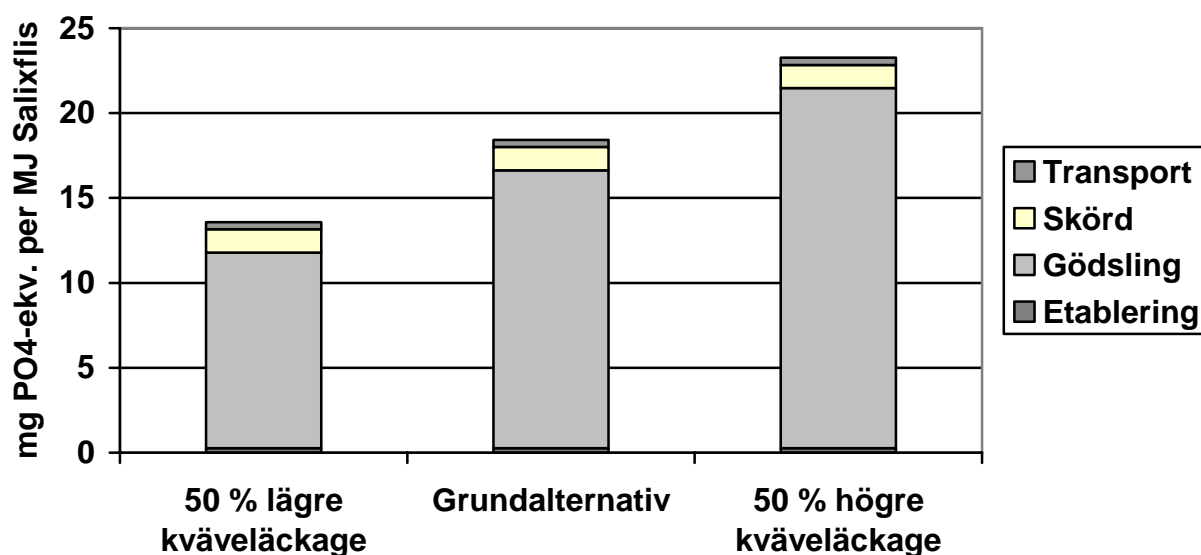
Som framgår av Figur 6.2 utgör emissioner av lustgas i samband med kvävegödsling en stor del av de totala utsläppen av växthusgaser vid produktion av Salixflis. En reduktion av lustgasutsläpp om 90 % vid tillverkning av kvävegödsel och om 50 % från åkermark vid kvävegödsling innebär att bidraget till växthuseffektpotentialen minskar med ungefär 40% per MJ Salixflis, jämfört med grundalternativet. Som jämförelse är utsläppen av koldioxid från fossil olja ungefär 76 g per MJ, inklusive utvinning och raffinering, d v s ungefär tio gånger högre än för produktion av Salixflis.



Figur 6.2. Bidraget till växthuseffektpotentialen (uttryckt som gram CO₂-ekvivalenter per MJ Salixflis) i grundalternativet och när utsläppen av lustgas reduceras med 90% vid kvävegödseltillverkning och med 50% från åkermarken vid kvävegödsling.

6.3. Kväveläckage

Kväveläckaget från Salixodling har här antagits uppgå till i genomsnitt 15 kg kväve per hektar och år. Kväveläckagets storlek kan dock variera betydligt utifrån de lokala förutsättningarna som jordart, nederbörd, gödslingsstrategi osv (Johnsson och Mårtensson, 2002). Generellt är dock läckaget från fleråriga grödor som Salix lägre än från ettåriga grödor tack vare att marken är bevuxen året om, gödslingsintensiteten är lägre och att fleråriga grödor utvecklar ett omfattande rotsystem. I Figur 6.3 beskrivs hur bidraget till övergödningspotentialen per MJ Salixflis förändras när kväveläckaget från Salixodling ökar eller minskar med 50 % jämfört med grundalternativet. En slutsats är att kväveläckaget har stor påverkan på det totala bidraget till övergödningspotentialen. När kväveläckaget förändras med 50 % förändras övergödningspotentialen med cirka 25 %. Andra betydande utsläpp av övergödande ämnen vid gödsling är ammoniakemissioner från åkermark och utsläpp av kväveoxider vid gödselmedelstillverkning.

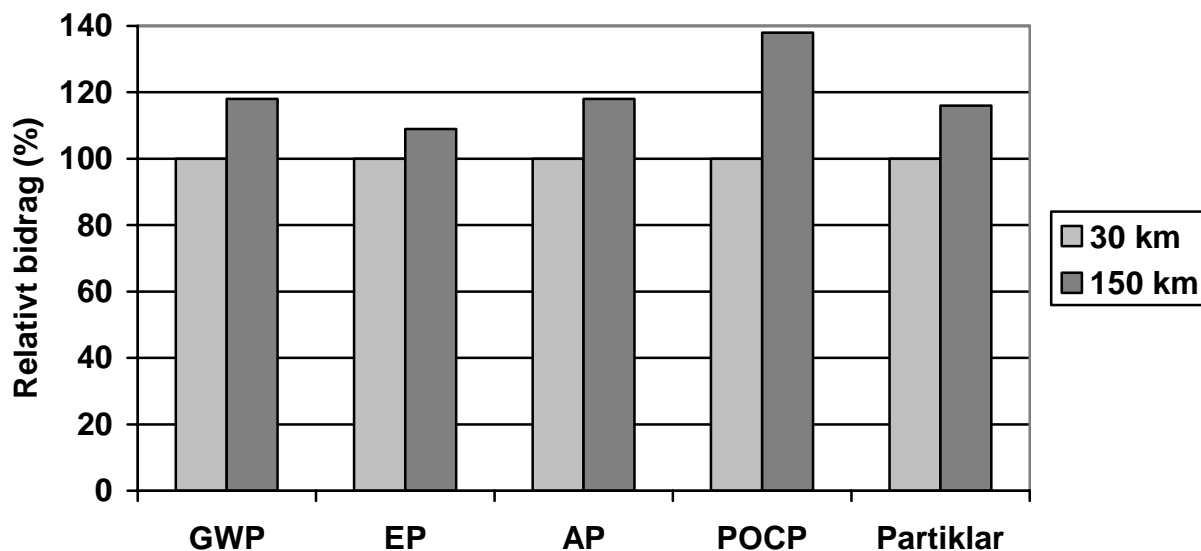


Figur 6.3. Bidraget till övergödningspotentialen (uttryckt som gram PO₄²⁻-ekvivalenter per MJ Salixflis) i grundalternativet och när läckaget av nitrat minskar respektive ökar med 50% per hektar och år.

6.4. Transportavstånd

Transportavståndet från fält till energianläggning antas i grundalternativet uppgå till 30 km enkel väg (se avsnitt 4.4). Denna uppskattning baseras på praktiska erfarenheter idag. I framtiden kan allt större energianläggningar komma att byggas, t ex för drivmedelsframställning eller olika slags energikombinatlösningar där också andra energibärare produceras (t ex el, pellets och värme). Detta innebär att transportavståndet för en del av biomassaråvaran kan bli längre. I Figur 6.4 beskrivs hur det relativa bidraget till respektive miljöeffektkategori ökar när transportavståndet är 150 km enkel väg, d v s fem gånger längre än i grundalternativet. Energibalansen

beräknas i detta fall minska till ungefär 15 och transportenergens andel av totala energiinsatsen ökar från 10 % till 35 %. Som framgår av Figur 6.4 ökar bidraget till respektive miljöeffektkategori per MJ Salixflis med mellan 9 % och 38 % där bidraget till potentialen för bildandet av fotokemiska oxidanter ökar mest.



Figur 6.4. Relativ skillnad i bidrag till respektive miljöeffektkategori per MJ Salixflis när transportavståndet för Salixflis ökar från 30 km (grundalternativet) till 150 km.

7 Slutsatser och diskussion

Salixodling är ett energieffektivt produktionssystem som ger drygt 20 gånger mer energi i form av biomassa än vad som krävs i form av insatsenergi. Utsläppen av växthusgaser är ungefär en tiondel per MJ jämfört med fossil olja. Bidraget till växthuseffekten, övergödningen, försurningen, bildandet av fotokemiska oxidanter samt av partiklar är betydligt lägre jämfört med produktion av ettåriga energigrödor eftersom energiinsatsen per MJ biomassa är lägre liksom gödslingsintensiteten och risken för kväveläckage. I jämförelse med odling av raps är t ex utsläppen av växthusgaser, övergödande ämnen, försurande ämnen samt ämnen som kan bilda fotokemiska oxidanter cirka 4,5, 2, 4 respektive 3,5 gånger lägre per MJ (Bernesson m fl., 2004a). Motsvarande skillnad jämfört med odling av vete är cirka 3,5 1,5, 3 respektive 3 gånger lägre (Bernesson m fl., 2004b). I dessa livscykelanalyser av raps- och veteodling ingår dock inte kväveläckage vilket skulle gett en ännu större skillnad i övergödningspotential till Salixodlingens fördel. Energibalansen för produktion av raps och vete beräknas av Bernesson m fl (2004a,b) till cirka 5,5 respektive 6,5 (exklusive halmskörd).

Den aktivitet i Salixodlingen som kräver mest insatsenergi, cirka hälften, och ger upphov till huvuddelen av emissionerna (med undantag för ämnen som kan bilda fotokemiska oxidanter) är gödning. Därefter kommer skörd och till sist etablering och transport. I denna analys antas handelsgödsel användas vilket kräver mycket

energi vid tillverkning och ger relativt höga utsläpp. Effektivare gödselmedelsproduktion med minskade utsläpp, t ex av lustgas, för därmed relativt stora positiva effekter på Salixodlingens miljöprestanda. Ett alternativ (och komplement) till handelsgödsel är organiska gödselmedel som t ex avloppsslam som också används i Salixodling idag. Energiätgång och emissioner vid spridning ökar något i detta fall jämfört med spridning av handelsgödsel men eftersom själva spridningen av gödsel utgör en mindre del av gödslingsinsatsens totala energiätgång (drygt 10 % för handelsgödsel) samt belastning av emissioner får denna ökning ett relativt begränsat genomslag. Eftersom rötslam från avloppsrening är en restprodukt som ofta inte utnyttjas ska denna restprodukt inte belastas med någon energiätgång för produktion. När avloppsslam ersätter handelsgödsel i Salixodling förbättras således energibalansen samtidigt som livscykelemissionerna minskar.

Ett annat alternativ att tillgodose Salixodlingens näringsbehov är att utnyttja avloppsvatten eller något annat näringsrikt vatten (t ex dräneringsvatten) för bevattning. Detta får en dubbel positiv effekt på nettoenergiutbyte och livscykelemissioner för Salixproduktion då energiskörden per hektar ökar samtidigt som emissioner från gödslingsinsatsen minskar. Energibalansen för Salix producerad med avloppsbevattning (i så kallade vegetationsfilter) beräknas dock bli ungefär lika, eller förbättras något, då extra energi krävs för att driva bevattningssystemet (Börjesson och Berndes, 2006). Nettoutbytet av energi per hektar kan däremot öka med mellan 30 % (sydvästra Sverige) till 100 % (sydöstra Sverige) jämfört med konventionell odling vilket medför stora positiva effekter på livscykelemissionerna. En viss produktion av lustgas fås i Salixodlingen när kväverikt avloppsvatten påförs men detta ökade bidrag av växthusgasemissioner motsvarar grovt endast cirka 10 % av klimatnyttan som fås när den ökade Salixskörden ersätter fossila bränslen (Börjesson och Berndes, 2006).

Sammanfattningsvis framstår Salixodling som ett energi- och resurseffektivt produktionssystem av bioenergi i jämförelse med andra, framför allt ettåriga odlingssystem. Livscykelemissioner per energienhet är också betydligt lägre för Salix jämfört med ettåriga energigrödor. Salixodlingens livscykelemissioner blir ännu lägre om gödsling med näringsrika restprodukter som avloppsslam och avloppsvatten utnyttjas och ersätter handelsgödsel.

8 Referenser

- Andersson A. (2005). Yara Sverige. Personlig kommunikation.
- Baumann H. and Tillman A-M. (2004). The hitch hiker's guide to LCA – An orientation in life cycle assessment methodology and application. Studentlitteratur, Lund.
- Bouwman A m fl. (2002). Emissions of N₂O and NO emissions from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochemical Cycles* **16**, 4-
- Berglund M. and Börjesson P. (2006). Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. *Biomass and Bioenergy* **30**, 254-266.
- Berglund, M. and Börjesson P. (2003). Energianalys av biogassystem (Energy analysis of biogas systems). Report No 44, Environmental and Energy Systems Studies, Lund University, Lund.
- Bernesson S. (2004). Life cycle assessment of rapeseed oil, rape methyl ester and ethanol as fuels – a comparison between large- and small-scale production. Report 2004:01, Department of Biometry and Engineering, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Bernesson S., Nilsson D. and Hansson P-A. (2004a). A limited LCA comparing large- and small-scale production of rape metyl ester (RME) under Swedish conditions. *Biomass and Bioenergy* **26**, 545-559.
- Bernesson S., Nilsson D. and Hansson P-A. (2004b). A limited LCA comparing large- and small-scale production of ethanol under Swedish conditions. Submitted to *Biomass and Bioenergy*.
- Blinge M., Arnäs P-O., Bäckström S., Furnander Å. och Hovelius K. (1997). Livscykelanalys av drivmedel. KFB-Meddelande 1997:5, Kommunikationsforskningsberedningen, Stockholm.
- Börjesson P. and Berndes G. (2006). The prospects for willow plantations for wastewater treatment in Sweden. *Biomass and Bioenergy* **30**, 428-438.
- Börjesson P. and Berglund M. (2006a). Environmental analysis of biogas systems – part I: Fuel cycle emissions. Submitted to *Biomass and Bioenergy* **30**, 469-485.
- Börjesson P. and Berglund M. (2006b). Environmental analysis of biogas systems – part II: Environmental impact of replacing various reference systems. Submitted to *Biomass and Bioenergy*.
- Börjesson P. (2004). Energianalys av drivmedel från spannmål och vall. Rapport 54, Miljö- och energisystem, Lunds Universitet, Lund.
- Börjesson P. and Berglund, M. (2003). Miljöanalys av biogassystem (Environmental analysis of biogas systems). Report No 45, Environmental and Energy Systems Studies, Lund University, Lund.
- Börjesson P. (1999). Environmental Effects of Energy Crop Cultivation in Sweden – Part I: Identification and Quantification. *Biomass and Bioenergy* **16**, 137-154.
- Börjesson P. (1997). Miljöeffekter vid odling av energigrödor – identifiering, kvantifiering och ekonomisk värdering (Environmental effects of energy crop cultivation – identification, quantification and economic valuation). Rapport 1997/4, Vattenfall Utveckling AB, Projekt Bioenergi, Stockholm.
- Börjesson P. (1996). Energy analysis of biomass production and transportation. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 11, pp 305-318.

- Börjesson P. (1994). Energianalyser av bibränsleproduktion i svenskt jord- och skogsbruk. Rapport 17, Miljö- och energisystem, Lunds Universitet, Lund
- Davis J. and Haglund C. Life cycle inventory (LCI) of fertiliser production: fertiliser products used in Sweden and Western Europe. SIK-Report 654, Göteborg.
- EPA (2002). Emission factor documentation for AP-42 section 3.1 stationary gas turbines. In Compilation of air pollutant emission factors, AP-42, fifth edition, volume I: Stationary points and area sources. US Environmental Protection Agency, Washington.
- ISO (1998). Environmental management – life cycle assessment – goal and scope definition and inventory analysis. International Organisation for Standardization, International Standard ISO 14 041-43. Geneva, Switzerland.
- ISO (2000). Environmental management – life cycle assessment – impact assessment. International Organisation for Standardization, International Standard ISO 14 041-43. Geneva, Switzerland.
- ISO (2000). Environmental management – life cycle assessment – interpretation. International Organisation for Standardization, International Standard ISO 14 041-43. Geneva, Switzerland.
- Hansson P-A., Bjurström A., Norén O. och Bohm, M. (1998). Bestämning av motoremissioner från lantbruksmaskiner inom jord- och skogsbruk. Rapport 232, Institutionen för lantbruksteknik, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Mattsson N., Unger T. and Ekvall T. (2005). Effects of perturbations in a dynamic system – The case of Nordic power production. Manuskript, Inskickat till Journal of Industrial Ecology.
- Sjöström G. (2006). Agobränsle. Personlig kommunikation.
- Sundqvist J-O., Bakay A., Björklund A., Carlsson M., Eriksson O., Frostell B., Granath J. och Thyselius L. (1999) Systemanalys av energiutnyttjande från avfall – utvärdering av energi, miljö och ekonomi. B 1380, Statens Energimyndighet, Eskilstuna.
- Rosenqvist H. (2006). Personlig kommunikation.
- Uppenberg S., Almemark M., Brandel M., Lindfors L-G, Marcus H-O, Strippe H., Wachtmeister A. och Zetterberg L. (2001). Miljöfaktabok för bränslen – Del 1. Huvudrapport. IVL-rapport B 1334A-2, IVL Svenska Miljöinstitutet, Stockholm.
- Vattenfall (2001). LCA Värme: Vattenfalls livscykelanalyser – produktion av värme. Vattenfall, Stockholm.

BILAGA 1. Karakteriseringsfaktorer

Karakteriseringsfaktorer för de miljöeffektkategorier som inkluderas i denna studie¹

Emissioner	Växthuseffekt ²	Övergödning ³	Försurning ⁴	Bildning av fotokemiska oxidanter ⁵
	GWP g CO ₂ -ekv./g	EP g PO ₄ -ekv./g	AP g SO ₂ -ekv./g	POCP g C ₂ H ₂ -ekv./g
CO ₂	1			
CO	2			0,032
NO _x		0,13	0,70	
NH ₃		0,35	1,9	
SO ₂			1	
HC				0,42
CH ₄	21			0,007
N ₂ O	320			
NO ₃ (till vatten)		0,10		

¹ Data från Baumann och Tillman (2004).

² Växthuseffekt uttrycks som Global Warming Potential (GWP) i form av koldioxidekvivalenter (100-års perspektiv).

³ Övergödning uttrycks som Eutrophication Potential (EP) i form av fosfatekvivalenter.

⁴ Försurning uttrycks som Acidification Potential (AP) i form av svaveldioxidekvivalenter.

⁵ Bildning av fotokemiska oxidanter uttrycks som Photochemical Oxidant Creation Potential (POCP) i form av etenekvivalenter.

BILAGA 2. Inventeringsdata

Emissioner vid tillverkning av handelsfödsel.¹

Parameter	Kväve (per kg N)	Fosfor (per kg P)
Energi (MJ)	45	25
CO ₂ (kg)	3,2	2,9
CO (g)	0,36	4,6
NO _x (g)	8,0	18
SO ₂ (g)	4,6	50
HC (g)	0,18	3,9
CH ₄ (g)	3,1	7,2
Partiklar (g)	0,82	9,5
N ₂ O (g)	18	0,29

¹ Avser livscykelemissioner. Data över energiinsats och emissionsnivåer baseras på Davis och Haglund (1999), som bearbetats i Börjesson och Berglund (2003). Emissioner vid tillverkning vid kaliumgödsel antas vara 20% av de från tillverkning av fosforgödsel (per kg), baserat på skillnader i energiåtgång vid tillverkning.

Emissioner vid olika traktoroperationer per MJ tillförd diesel.¹

	Harvning	Plantering / gödsling	Sprutning	Plöjning / fräsning	Transport -fält	Salixflisning
CO ₂ (g)	72	72	72	72	72	72
CO (g)	0,083	0,114	0,046	0,091	0,163	0,226
NO _x (g)	0,860	0,900	0,708	0,935	0,880	0,819
SO ₂ (g)	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
HC (g)	0,028	0,031	0,016	0,027	0,036	0,050
Partiklar (g)	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011

¹ Avser end-use emissioner, dvs exklusive emissioner vid framställning av diesel. Data från Hansson m fl (1998) avseende emissioner av CO, NO_x och HC samt Blinge m fl (1997) avseende emissioner av CO₂, SO_x och partiklar, som bearbetats i Börjesson och Berglund (2006). Avser MK1 diesel.

Emissioner vid flistransport med lastbil per MJ tillförd diesel.¹

CO ₂ (g)	72
CO (g)	0,011
NO _x (g)	0,72
SO ₂ (g)	0,002
HC (g)	0,011
Partiklar (g)	0,011

¹ Avser end-use emissioner, dvs exklusive emissioner vid framställning av diesel. Data från Blinge m fl (1997) och Sundqvist m fl (1999) som bearbetats i Börjesson och Berglund (2006). Avser MK1 diesel. Lastkapaciteten för lastbil är cirka 30 ton.

Emissioner vid framställning av 1 MJ diesel.¹

CO ₂ (g)	4,0
CO (g)	0,002
NO _x (g)	0,040
SO ₂ (g)	0,019
HC (g)	0,033
Partiklar (g)	0,001

¹ Data från Blinge m fl (1997) som bearbetats i Börjesson och Berglund (2006). Avser MK1 diesel. Inkluderar utvinning, raffinering och distribution.

Emissioner vid elproduktion per MJ tillförd naturgas.¹

	End-use emissioner	Livscykelemissioner
CO ₂ (g)	56	60
CO (g)	0,024	0,030
NO _x (g)	0,10	0,12
SO ₂ (g)	0,001	0,002
HC (g)	0,001	0,004
CH ₄ (g)	0,003	0,013
Partiklar (g)	0,001	0,003

¹ Avser gasturbin med en verkningsgrad om 50%. Sammanställning av data från EPA (2002); Uppenbergs m fl (2001) & SNV (2000), som bearbetats i Börjesson och Berglund (2006).

Emissioner vid storskalig förbränning av olja och kol (per MJ bränsle).¹

	Olja	Kol
CO ₂ (g)	76	94
CO (g)	0,02	0,04
NO _x (g)	0,14	0,07
SO ₂ (g)	0,21	0,07
HC (g)	0,008	0,002
CH ₄ (g)	0,004	1,1
Partiklar (g)	0,007	0,03

¹ Avser livscykelemissioner, dvs inklusive emissioner från framställning av olja respektive kol. Bearbetad data från Uppenbergs m fl (2001), Vattenfall (2001) & Börjesson och Berglund (2006).

BILAGA 3. Resultatsammanställning

Energüinsats och emissioner vid produktion av Salixflis - grundalternativet (per hektar och år).

Aktivitet	Energi MJ	CO ₂ kg	CO g	NO _x g	SO ₂ g	HC g	CH ₄ g	Part. g	N ₂ O g	NH ₃ g	NO ₃ kg
<i>Etablering & återställning</i>											
Plöjning	85	7,0	7,1	69,3	2,5	4,2	5,9	1,0	0	0	0
Harvning	45	3,7	3,5	34,0	1,3	2,3	3,1	0,6	0	0	0
Plantering	30	2,5	3,1	23,6	0,9	1,6	2,1	0,4	0	0	0
Sprutning	20	1,6	1,0	12,7	0,6	0,8	1,4	0,3	0	0	0
Fräsning	140	11,5	11,7	114,1	4,2	6,9	9,6	1,7	0	0	0
Prod – sticklingar	330	33,3	13,7	64,7	35,3	2,7	5,2	2,2	0	0	0
Prod – sprutmedel	30	2,7	1,1	5,2	3,2	0,2	0,4	0,2	0	0	0
S:A	680	62,3	41,2	323,5	48,1	18,7	27,6	6,3	0	0	0
<i>Gödsling</i>											
Spridning	450	36,9	46,0	354,2	13,4	23,6	31,0	5,5	0	0	0
Prod – N-gödsel	2900	204,8	23,0	512,0	294,4	11,5	198,4	52,5	1984 ¹	2560 ¹	15 ¹
Prod – P-gödsel	180	20,3	32,2	126,0	350,0	27,3	50,4	66,5	2,0	0	0
Prod – K-gödsel	120	13,3	21,1	82,8	230,0	17,9	33,1	43,7	1,3	0	0
S:A	3650	275,4	122,4	1075	887,8	80,4	312,9	168,2	1987	2560	15
<i>Skörd</i>											
Flisning	1700	139,5	326,2	1227,7	50,7	115,1	117,1	20,9	0	0	0
Fälttransport	530	43,5	75,0	408,6	15,8	29,9	36,5	6,5	0	0	0
S:A	2230	183,0	401,2	1636,4	66,5	145,0	153,6	27,5	0	0	0
<i>Transport</i>											
S:A	710	55,6	11,1	506,6	17,8	29,1	16,5	8,5	0	2560	15
S:A Totalt	7270	576,3	576,0	3541	1020	273,1	510,6	210,5	1987		

¹ Inklusive emissioner från åkermark

ISSN 1102-3651
ISRN LUTFD2/TFEM--06/3051--SE + (1-21)
ISBN 91-88360-83-0